

ESTRUCTURAS METÁLICAS PRETENSADAS EN EDIFICACIÓN.

Evolución histórica y situación actual.

Ignacio Costales Calvo

Dr. Arquitecto

Laboratori d'Innovació i Tecnologia a l'Arquitectura

Universitat Politècnica de Catalunya (ETSAV-UPC)

BEST Costales Jaén SLP

nacho.costales@bestbcn.net

RESUMEN

El pretensado en estructuras no solo es patrimonio del hormigón armado: el acero pretensado empezó casi un siglo antes, pero su uso ha tenido menos recorrido y aplicación que en el caso del hormigón. La introducción de acero de alta resistencia lo hizo posible: es una solución necesaria en muchos casos, y generalmente se le asocia con situaciones de necesidad de pequeño canto para luces grandes, entre otras aplicaciones. No sucede así con el acero pretensado, donde raramente encuentra aplicación, más allá de los tornillos pretensados y de las vigas Fynk de débil rigidez. Pero, ¿qué puede realmente aportarnos un pretensado en un material sin retracción, ortótropo y 10 veces más resistente que el hormigón?

PALABRAS CLAVE: acero pretensado, control deformacional, puentes metálicos, inversión de esfuerzos, acero de alta resistencia, estructuras metálicas.

1. Introducción

Generalmente solemos referirnos a Eugene Freyssinet como el inventor de las estructuras pretensadas de hormigón armado, pues en 1928 patenta su sistema básico que describe el procedimiento mediante pre-tensión y cables adherentes [1]. Esta afirmación es en parte correcta, pues se le considera el padre del hormigón pretensado moderno. Sin embargo, 40 años antes ya había habido un intento fallido de pretensar piezas de hormigón.

Si entendemos que el siglo XX es, estructuralmente hablando, el siglo del hormigón armado, y que el XIX fue el del acero, entenderemos que la mayor cantidad de avances del acero, fueron luego aplicados con mayor rapidez al hormigón armado. El primer puente de hierro conocido, el Coalbrookdale, fue erigido por Abraham Darby III y por Thomas Farnolls Pritchard en 1781, 76 años antes de que a Monier introdujese acero en sus macetas de hormigón. Durante esos años, hubo tiempo a inventar y a patentar la mayor cantidad de vigas en celosía, que en parte habían sido usadas también antes en madera, incluso habiéndose introducido fuerzas de pretensado en algún caso, a distinguir el uso del acero forjado del fundido, a entender que el acero funciona mal bajo la acción del fuego, y también a entender algunos efectos del pretensado de un sistema estructural[2]. En realidad el hormigón armado pretensado no pudo ser posible hasta que no se fabricaron aceros de alta resistencia y de alto límite elástico. Queda claro entonces que el éxito de Eugene Freyssinet no sólo se debió a su constancia, inteligencia y capacidad, sino también a haber nacido en el momento adecuado.

2. Situación histórica del pretensado de las estructuras metálicas

En América se considera a Squire Whipple el padre de los puentes metálicos americanos[3], aunque como en el caso de la primera construcción en hormigón armado, americanos y europeos se disputan el privilegio. En 1838 solicita una patente donde el armazón del puente está compuesto por elementos de compresión contruidos en hierro fundido, y de hierro forjado en los elementos tensionados. Se sabe que Whipple denominó a su sistema “truss Whipple”, y se cree que pretensó el cordón inferior comprimido construido en acero fundido (cast iron), mediante un elemento forjado (wrought iron), aunque no queda claro.

En 1845 Richard B. Osborne diseña el primer puente metálico para el ferrocarril americano, mediante dos vigas tipo Brown, supuestamente pretensadas verticalmente, utilizando elementos de fundición que remplazaban a los elementos de madera comúnmente usados hasta entonces. Los únicos elementos que eran de acero forjado eran las barras de relleno triples verticales que se pretensaban para unir las piezas, eliminando la necesidad de atornillado[4]. Existe otro puente de H. Rider que en 1848 pretensa las diagonales con el mismo fin. En Checoslovaquia, en la segunda mitad del siglo XIX, se utilizó una variante que consistía en utilizar diagonales más robustas y montantes verticales resueltos mediante barras redondas que se pretensaban. El pretensado tenía una doble función: armar la pieza y conseguir que todas las diagonales desde un inicio estuvieran comprimidas; de esta manera, unas se descomprimirían y las otras aumentarían su compresión. Aun así el pretensado era manual y con barras de acero pudelado, que no eran de alta resistencia.

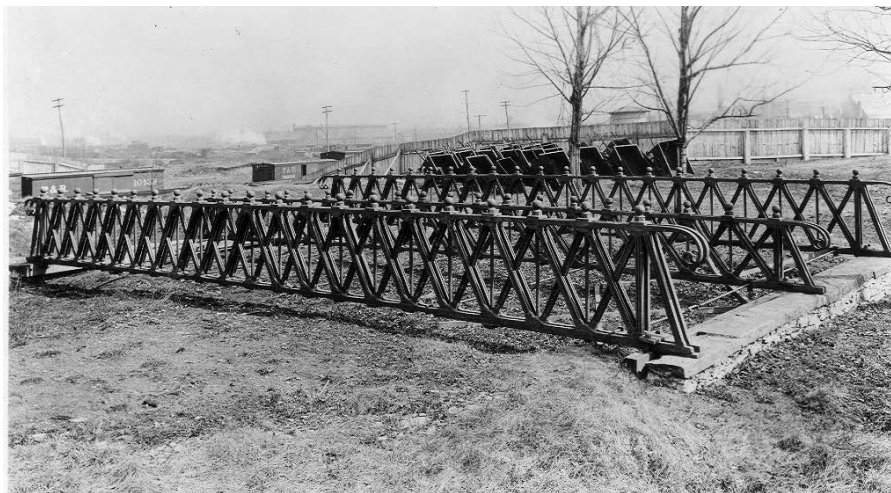


Imagen 1. Puente sobre un pequeño arroyo al oeste de Manayunk. Richard B. Osborne.

Fuente: Railroad Museum of Pennsylvania

En 1869 el inglés Theodore Jones aplicó radios de acero a la primera bicicleta modelo Phantom. Los había patentado en 1826.[5] Sin embargo se cree que el verdadero inventor de esta solución fue Sir George Cayley en 1808, pero no la patentó, a pesar de que su invento estaba bien explicado.[6]

En 1895 se finaliza la primera construcción tensada que se conoce, el Oval Pavillion de Vladimir Shukhov. Este ingeniero ruso, que es considerado uno de los más importantes de la historia reciente, pasa por ser además el primero en construir una estructura en celosía con curvatura sobre los dos ejes, y de construir varios hiperboloides de acero de hasta 160 metros de altura. Además del oval Pavillion, construye otras dos estructuras tensadas[7].

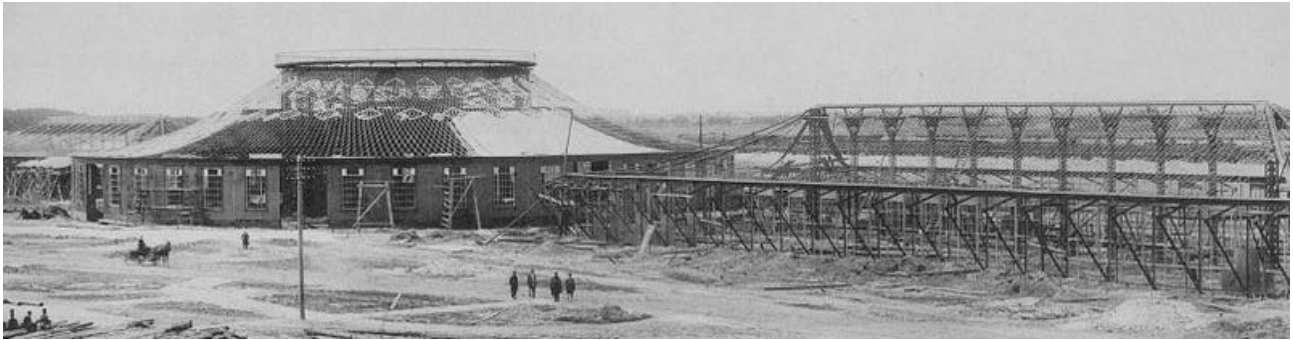


Imagen 2. Vista de La rotonda y de La gran sala de máquinas.

Fuente: Wikimedia commons, Andrei Osipovich Karelin (1837–1906)

Kenneth D. Snelson empieza a investigar en 1948 con estructuras ligeras que, mediante pilares y tirantes, consiguen un equilibrio gracias al tensado de los cables. Estos sistemas serán bautizados más tarde por Füller como tensegrities. Kenneth es el autor de una de las tensegrities más conocidas: la torre Neddle. Estas estructuras tienen una notable mejoría deformacional, si se pretensan los elementos traccionados tipo cable.[8]

Baes y Abraham Lipski desarrollan la técnica de la preflexión en 1950[9]. El sistema de vigas Preflex parte de una viga en doble T que ya tiene cierta contraflecha. En el ala inferior se le sueldan unos conectores y unas barras metálicas a modo de estribos y de armado longitudinal. Se le aplican fuerzas verticales mediante gatos, generalmente dos iguales, a $L/4$ de los apoyos. Así se consigue que la viga quede plana. Entonces se le hormigona la aleta inferior en forma de C. Cuando el hormigón se ha endurecido, se le retiran las fuerzas. La viga recupera parte de la deformación, quedando un poco menos contraflechada que en el inicio, debido a la rigidez del nuevo hormigón. El hormigón quedará precomprimido, por lo que podrá descomprimirse, y protegerá el ala contra el fuego. Finalmente se coloca en obra consiguiendo una viga de menor sección que una estándar.



Imagen 3. Aplicación de las vigas Preflex en un edificio de Bruselas. Abrham Lipski.

Fuente: S. Van De Voorde, V. U. Brussel, and L. Taerwe

En 1950 Leo Coff patentó en Estados Unidos un sistema de vigas metálicas pretensadas mixtas que utilizaban dos tipos de activación: uno interno en forma poligonal y uno inferior recto.

En el festival of Britain, en 1951, se construye el Skylon, de los arquitectos ingleses Hidalgo Moya y Philip Powelly. La torre, que fue derribada al acabar la feria, debía ser pretensada para reducir las deformaciones causadas por el viento.

En 1961 J. D. Naillon, en Estados Unidos, desarrolló una patente de pretensado de perfiles metálicos. En ella recogía tres soluciones: una viga en vientre de pez invertida, un sistema de ménsula pretensada y una viga laminada con pretensado inferior recto.

El fabricante asturiano de viguetas pretensadas de hormigón, Rubiera, anuncia en el periódico ABC madrileño en 1971, unas viguetas metálicas denominadas Preflex, que ha usado con éxito en varios edificios en España bajo la autorización de uso nº1509/71 del ministerio de vivienda[10]. Con este sistema de vigas y viguetas, había conseguido cubrir luces de hasta 35m con sistema de vigas biapoyadas y de hasta 15 m en voladizo. Anteriormente, en 1969, Rubiera había patentado unos sistemas de pretensar vigas de hormigón con alma metálica interna.

3. Aplicaciones del acero pretensado

Después de esta introducción a la evolución del pretensado del acero, se desarrollan las cuatro soluciones más frecuentes usadas en pretensado de perfiles metálicos.

3.1. El pretensado como herramienta de conexión

Durante muchos años las uniones fueron diseñadas mediante roblones, que se colocaban al rojo vivo previo calentamiento en carbón a pie de obra. Al ser colocados, se forjaba la cabeza que cerraba cada conexión, y al enfriarse la pieza, el roblón pretensaba las chapas intermedias. Este efecto dejó de ser usado con la introducción de los tornillos ordinarios y calibrados. Cuando pudieron fabricarse tornillos de alta resistencia, se recuperó la idea de introducir un pretensado en los casos donde se precisaba que las uniones fuesen lo menos deformables posibles. Uno de las mayores dudas es sobre cómo puede un tornillo previamente pretensado que se tracciona, no ve aumentado su axil por efecto de la fuerza aplicada. Es así porque el esfuerzo axil de pretensado inicial, se reduce cuando las chapas se comprimen, y cuando las chapas se separan, el tornillo tiende a recuperar el valor del pretensado aplicado, hasta el momento exacto en el que se separan, cuando el axil del tornillo coincide con el del pretensado.[11]

En este apartado podría ser incluido el primer puente de ferrocarril de Richard B. Osborne, citado en el apartado anterior, donde las barras de relleno verticales eran las responsables de unir el resto de las piezas dentro del marco de la cercha tipo Brown. También los tornillos pretensados. Otra aplicación habitual es cuando se unen vigas en celosía metálicas con muros de hormigón armado: el cordón traccionado puede ser unido mediante postesado a la pantalla. Un ejemplo puede ser los voladizos del museo del diseño en Barcelona, obra de los arquitectos Martorell Bohigas i Mackay (MBM) Finalmente podemos mencionar también aquí el pretensado entre dos vigas UPN que hacen de nuevo dintel para una puerta en una estructura de paredes de carga de fábrica de piezas.

3.2. El pretensado como controlador de deformaciones

Generalmente una viga metálica tiene igual rigidez vertical ascendente que descendente, por eso se usa la misma inercia en el cálculo en ambas situaciones. En el caso de una viga Fynk no es así: cuando la carga es descendente, viga y funicular reparten el momento en función de sus rigideces para mantener el equilibrio, mientras que si la carga es ascendente, es únicamente la viga la

responsable de este equilibrio, y posiblemente el pandeo lateral pueda reducir aún más su capacidad, pues el arriostramiento horizontal suele situarse en el ala superior. Una viga metálica habitualmente se dimensiona según tensión normal de sus alas (ELU), o por un límite en la deformación (ELS). Y en casos concretos, por tensión tangencial (ELU), concretamente cuando hay cargas puntuales importantes aplicadas. La frontera entre el cálculo tensional normal elástico y el deformacional, se puede establecer con la siguiente tabla:

	Luz/Canto (S-235/S-275/S-355/S-410)			
Tipo de vinculación y de carga aplicada:	L/250	L/300	L/400	L/500
Biarticulada Carga lineal	18/ 15 /11/9	15/ 12 /9/7	11/ 9 /7/5	9/ 7 /5/4
Biarticulada Carga concentrada	22/ 19 /14/11	18/ 16 /12/9	14/ 12 /9/7	11/ 9 /7/5
Apoyada-empotrada Carga lineal	43/ 37 /28/22	36/ 30 /23/18	27/ 23 /17/14	21/ 18 /14/11
Apoyada-empotrada Carga concentrada	38/ 32 /25/20	32/ 27 /21/16	24/ 20 /15/12	19/ 16 /12/10
Biempotrada Carga lineal	60/ 51 /39/31	50/ 42 /33/26	37/ 32 /24/19	30/ 25 /19/15
Biempotrada Carga concentrada	45/ 38 /29/23	37/ 32 /24/19	28/ 24 /18/14	22/ 19 /14/11

Tabla 1. **Límite relación Luz y Canto para que una viga esté diseñada por tensión o por deformación, en cálculo elástico, en función del límite de la flecha.** Fuente: Autor.

3.2.1. Explicación

Si consideramos una viga Fynk de dos tramos, con un mástil central, podemos fácilmente entender que, para cualquier caso de carga, las soluciones que podemos definir, son muy variadas. Como se ha comentado, estamos trabajando con dos rigideces: la del funicular inferior y la de la viga superior. Para entenderlo bien supongamos que el funicular queda mal tensado y que la viga es suficientemente rígida para resolver todo el trabajo. O de otra manera, supongamos que los dos soportes extremos sean infinitamente rígidos en cuanto a desplazamiento horizontal, y es el funicular el que transmite toda la carga sin necesidad de la rigidez de la viga. Así entenderemos que cualquier situación intermedia puede tener una solución distinta. Parece claro que la solución mejor sería la que menos kilos de acero tenga dentro de las restricciones de espacio libre, y olvidándonos de otros límites, como puede ser la resistencia al fuego, por ejemplo.

Ahora bien, si la viga está dimensionada por deformación, tendrá una reserva de tensiones intacta, que puede ser usada para colocar un funicular e intentar recuperar deformación. Si entendemos que la viga funcionaba sola sin necesidad de funicular, podemos aceptar que el pretensado es un sistema de fuerzas que va en dirección ascendente y que comprime la viga. Por lo que si las acciones que se aplican en la viga después de pretensarla, no crean una deformación que supere la deformación anterior al efecto de pretensado, el cable no debería de resistir tracciones mayores a las del pretensado. Lo mismo sucede cuando se pretensa un tornillo, o un anclaje de una pantalla, por ejemplo, considerando la precompresión de las tierras.

Aun así, queda claro que, a mayor canto del mástil central coincidente con el montante, o a mayor inclinación del funicular, menor compresión de la viga y, por lo tanto, menor número de tendones.



Imagen 4. Dos vigas Fynk de diferente rigidez: Izquierda, una viga dimensionada como una viga en celosía. Derecha, una viga en doble T donde se añade un pretensado para reducir su deformación. Fuentes: Bach i Mora; Viga pretensada, Studio Nunziata)

Una viga Fynk puede ser un elemento pasivo, si el pretensado es únicamente para conseguir que el funicular no provoque deformaciones instantáneas de ajuste no controladas, o activo, si se hace un análisis de deformaciones y de tensiones inicial y final. Conviene tener presente que el tipo de acciones que se apliquen sobre la viga condicionará el resultado. Si la acción es una carga puntual central, no será lo mismo que si se trata de una carga repartida linealmente sobre toda la viga, por poner un ejemplo que ilustre la condición anterior.

3.2.2. Referencias

Algunos ejemplos que pueden ilustrar esta solución son:

- Apeo del pati dels Taronjers, Robert Brufau i Niubó, Estructura. En este proyecto se colocan unas vigas Fynk dentro de un conjunto de bóvedas consiguiendo así eliminar los pilares interiores.
- Pabellón recinto ferial y deportivo en Tortosa. David García i Carrera, Estructura. Son vigas celosía espaciales, en la que se insertan en el cordón inferior tubular, varios tendones que consiguen reducir la deformación. Gracias a su forma en vientre de pez, el pretensado es muy eficaz, pues se ajusta al trazado de una catenaria.
- Ampliación de la Fira de Barcelona en L'Hospitalet nave 2, Robert Brufau i Niubó, Estructura. Se propone un pretensado en una viga con continuidad de 45m de luz, consiguiendo rebajar en 5kg/m² la cuantía de acero en un recinto de 45.000m²
- Edificio Forum 2004, WGGSP y Robert Brufau i Niubó, Estructura. Dentro de la sala de instalaciones, se alojan un pretensado interior que reduce la deformación de la fachada y concretamente de los voladizos de las esquinas.
- Iglesia romana-católica st John Brebeuf en Niles. Gaul & Voosen, Paul Rogers & Associates [12] Mediante un pretensado perimetral en una cúpula, se consigue, gracias a la introducción de un contrapeso que se retira progresivamente, colocar un tronco de cono de gran altura que descompensaría el conjunto en caso de no estar pretensado.

- Puente sobre el barranco de Cavalls en Valencia. Hugo Corres Peiretti, Alejandro Pérez Caldentey.[13] En este puente se consigue reducir la deformación del sistema gracias a la incorporación de cuatro tendones que se colocan en los tercios extremos del puente, dos en cada tramo.
- Viga cargadero en la torre Espacio, Madrid. Julio Martínez Calzón, Estructura [14] Es una viga en celosía que apea uno de los pilares de fachada. Para reducir su deformación, y por tanto el canto de los forjados superiores, se aplica un pretensado que reduce la deformación final.
- Pabellón de los descubrimientos, Expo'92[15]. 1989-1991, Javier Rui-Wamba, Estructura. Se disponen unas pasarelas Vierendel que se pretensan mediante tensores exteriores en diagonal.

3.3. El pretensado como responsable del cambio la rigidez de un sistema

El concepto de parteluz es muy ambiguo. Cuando a un estudiante no iniciado le pides que dibuje un parteluz en un sistema de viguetas de madera de igual luz, concretamente en una sala cuadrada, lo que generalmente te dibuja es una viga ortogonal a las anteriores, y con buen criterio en el punto medio de la luz. Si luego le propones una puerta en el punto medio de la pared, puede ser que coloque un dintel o que opte por colocar dos parteluces. Esta solución, que parece ajustarse a lo solicitado, tiene un efecto perverso: cambia por completo la transmisión de las reacciones hacia la cimentación, y este es el aspecto que no se suele tener presente. Aun así es una solución que va muy bien para masías, o en estructuras murarias donde el peso de los cerramientos es muy superior al de los forjados, y por lo tanto un poco menos de carga allí, y un poco más aquí, puede ser que hasta sea un beneficio para un sistema que presente asentamientos poco acentuados. Esto es así siempre y cuando el vecino inferior no ha abierto una puerta de grandes dimensiones y nos queda una pared no apta para hacer un arco de descarga.

Si la sala tiene dimensiones cuadradas, el problema es de un tipo, pero si la sala tiene dimensión rectangular con las viguetas colocadas en la dirección corta, el problema es bien diferente: El peso de la viga puede hacer que la solución sea incorrecta o imposible.

3.3.1. Explicación

Aun así, cabe preguntarse si un parteluz mal entendido es correcto, si aceptamos que la carga se vaya por otro muro y las cimentaciones sufran alteraciones de carga. Si solucionamos este problema, podemos analizar las siguientes imágenes:

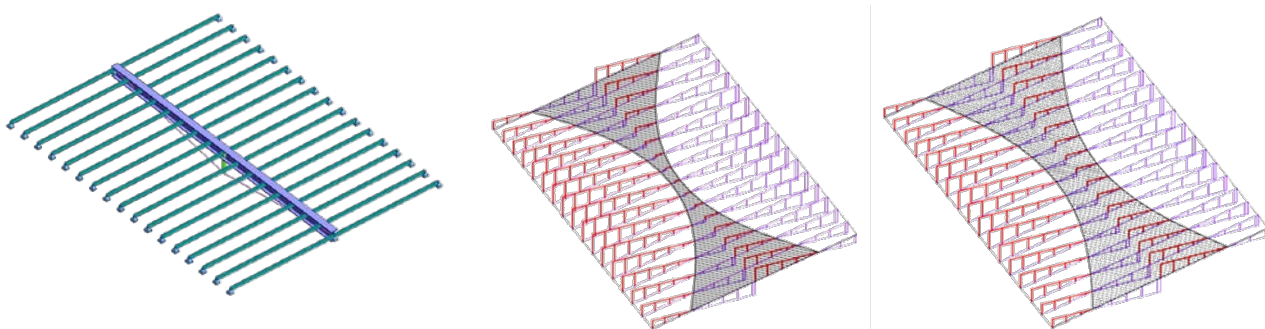


Imagen 5. Distribución habitual del ancho de banda, referido a sus diagramas de cortantes, de un parteluz no activado.[16]

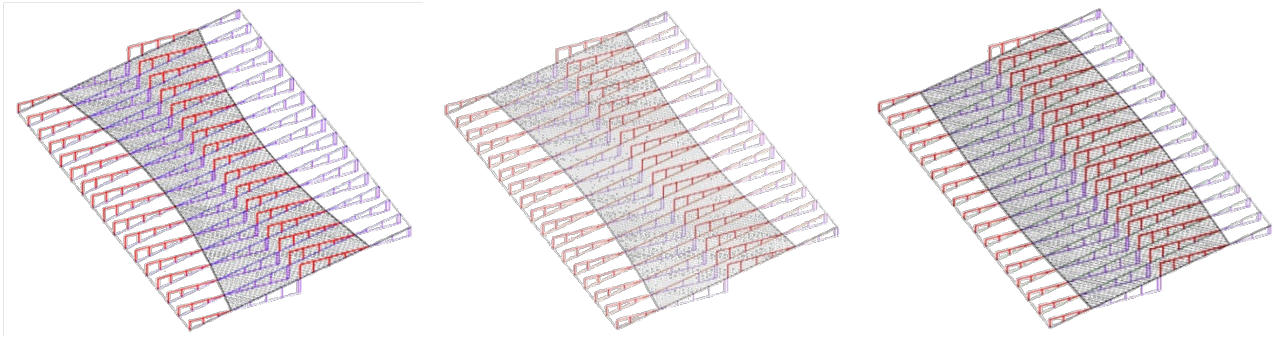


Imagen 6. Distribución habitual del ancho de banda, referido a sus diagramas de cortantes, de un parteluz activado.[16]

Las figuras muestran el ancho de banda que realmente le corresponde a un parteluz mal entendido. Las primeras imágenes muestran las soluciones habituales donde se coloca una viga, generalmente de poco canto, y que funciona muy bien para las primeras y últimas vigas, y que pueden o no ayudar en el centro. Cuanto más queramos que las vigas centrales trabajen como las otras, mayor dimensión alcanzará la nueva viga, y más pesará, y más difícil será ponerla en su sitio, si es que el propietario acepta perder esa altura. Esto sucede porque el parteluz siempre sufrirá diferente deformación en su punto medio, donde será máxima, que en los extremos, donde será casi nula.

Ahora bien, si la viga se pudiese activar, si sería posible conseguir que las vigas centrales trabajasen en igual o en mayor medida que las otras, tal como se puede comprobar en las últimas imágenes.

3.3.2. Referencias

Algunos ejemplos que pueden ilustrar esta solución, son:

- La cubierta del pabellón de baloncesto de Badalona. Agustí Obiol i Sánchez. Estructura. En esta estructura se hace un pretensado mediante barras macizas en las vigas cajón, y mediante tendones postesados deslizantes en la viga fink de gran luz. El postesado fue ejecutado progresivamente con tal de no destensar los pórticos transversales a los que se introducía el pretensado.
- Cubierta del Gimnasio en San Carlos, Venezuela. Oscar y Esteban Tenreiro y Robert Brufau, Estructura. Esta cubierta cuenta con dos vigas transversales en una dirección, y otra en la dirección perpendicular. Para completar el sistema, se colocan otras vigas Fynk sencillas en los espacios intermedios.
- El atrio del Hesperia Tower. BOMA, Estructura. En este caso se pretensa una serie de cables que permite tener tres puntos fijos en el espacio que dan soporte a una cubierta ligera. Así lo que sería una viga de gran luz, queda dividida en tres tramos consiguiendo pequeñas dimensiones y una cuantía menor de acero.

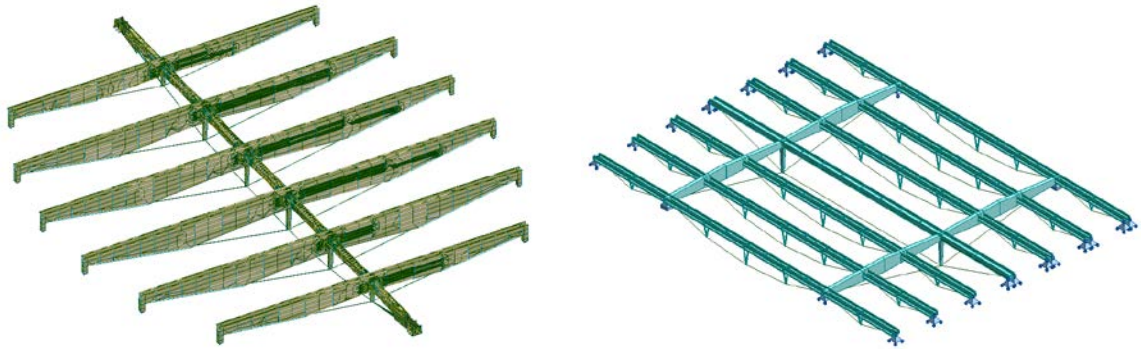


Imagen 7. Comparación de la cubierta del Jouventut de Badalona, Agustí Obiol Estructura con la Cubierta del Gimnasio en San Carlos, Venezuela. Esteban Tenreiro y Robert Brufau, Estructura. Fuente: Autor

3.4. El pretensado como herramienta para invertir los esfuerzos de un elemento o subestructura.

Es habitual que una cruz de San Andrés esté formada por elementos poco rígidos, habitualmente angulares o barras de pequeño diámetro. Si calculamos el pórtico en cálculo lineal, comprobaremos que ambas barras funcionan con un axil igual, aunque de signo contrario. Si damos por buena esta situación, cuando construyamos el pórtico, las diagonales tendrán el doble de axil que las del modelo. El pórtico también se deformará el doble. Este fenómeno sucede porque la barra comprimida no puede dar una respuesta lineal, y cuando pandea, pierde la rigidez. Si lo calculamos en no lineal de esfuerzos, podremos fácilmente comprobar que es así. [17] Por lo tanto si pretensamos las dos diagonales con un esfuerzo axial mayor al axil final de las diagonales, podremos conseguir ajustar la deformación a la obtenida en el cálculo lineal, y por tratarse de un pretensado, la diagonal no alcanzará un axil mayor al obtenido en el cálculo referido, y nunca se comprimirán.

3.4.1. Explicación

Podemos usar el pretensado para conseguir que un elemento que trabaja pasivamente de una manera, lo haga finalmente, activándola, de forma opuesta. Por ejemplo, podemos conseguir que un elemento estructural que trabaja naturalmente a compresión, lo haga siempre a tracción, o un elemento que funcione a flexión negativa, trabaje finalmente a compresión positiva. Una solución poco conocida es el pretensado que se aplicó en la cubierta de la terminal 4 de Barajas[18], trabajo a cargo de L. Viñuela Rueda y R. J. Martínez Salcedo. En los planos de fachada, y coincidiendo con cada pórtico, se colocaron unos agujeros, que son actualmente visibles, con el fin de colocar unas piezas metálicas que eran las responsables de permitir aplicar un postesado que quedaba equilibrado con el suelo. Así se conseguía que el techo bajase unos milímetros. Entonces se colocaba una viga en forma de doble vientre de pez, comúnmente denominada “kipper truss”. Esta viga se unía sin coliso a ambos planos. Finalmente, cuando la fachada quedaba instalada, se retiraba el pretensado y la cubierta intentaba recuperar la posición, subiendo ligeramente en ese punto. Así las vigas de fachada quedan siempre traccionadas, aunque se apliquen las sobrecargas de nieve.

3.4.2. Referencias

Algunos ejemplos que pueden ilustrar esta solución son:

- Las vigas “kipper truss” de la terminal 4 de Barajas. Ya explicadas en el apartado.
- El atrio del Hesperia Tower[19]. BOMA Estructura. También mencionadas en el caso anterior, pero en este caso centrado en el efecto que se consigue en el cerramiento, donde los elementos de soporte siempre funcionan de manera comprimida.
- El Skylon del Festival of Britain, Powel y Moya. En realidad es una tensegritie que precisa de un pretensado para poder trabajar en equilibrio, consiguiendo así que los cables queden siempre traccionados.



Imagen 8. Izquierda, pretensado del techo de la terminal 4 de Barajas. Derecha análisis deformativo del Skylon. Fuente: Hormigón y acero 239; Autor.

4. Conclusiones

El acero pretensado empezó a aplicarse incluso antes que el hormigón armado, en la segunda mitad del siglo XIX en EEUU. Aun así las aplicaciones que este sistema puede ofrecernos son muy reducidas, puesto que el material base, el acero, tiene un límite elástico 10 veces mayor que el hormigón armado, y no tiene retracción o deformación diferida. A pesar de lo anterior se ha descrito una descripción de las posibilidades que este sistema ofrece, su aplicación, así como algunos ejemplos para ilustrarlos. Los usos mencionados son:

- El pretensado como herramienta de conexión.
- El pretensado como controlador de deformaciones.
- El pretensado como responsable del cambio la rigidez de un sistema.
- El pretensado como herramienta para invertir los esfuerzos de un elemento o subestructura.

El uso del pretensado en acero no se suele aplicar correctamente, puesto que se suele sumar el efecto del pretensado con el de la tracción elástica. Desde hace tiempo los avances en este campo se ha quedado estancados, puesto que en muchos casos basta con dar más dimensión al elemento, o con poner más acero. Puede que en un futuro si se consiguen aceros de mayor resistencia, se puedan generar nuevas soluciones o se pueda aumentar su uso. Mientras tanto se seguirán confundiendo las estructuras tensadas con las estructuras pretensadas.

5 Agradecimientos

A la Associació de Consultors d'Estructures por haber permitido publicar este artículo, a Robert Brufau i Niubó, por haberme permitido participar profesionalmente en algunos de los ejemplos, y a aquellos compañeros de universidad que me han animado a realiza publicaciones en revistas y en congresos.

NOTA: A lo largo del texto se han mencionado a los autores o a los colaboradores en el capítulo de estructuras de cada proyecto, y se ha omitido intencionadamente el despacho redactor del proyecto arquitectónico, dado el enfoque específico del artículo. Sirva esta nota para reconocer que el trabajo de los consultores de estructuras jamás sería posible sin la dirección de los arquitectos responsables de cada proyecto.

6 Bibliografía

- [1] A. Freyssinet E.; Guyon, F.; Rui-Wamba, J.; Fernández Alba, *Eugène Freyssinet, un ingeniero revolucionario*. Madrid: Fundación Esteyco, 2003.
- [2] D. A. Gasparini and F. da Porto, "Prestressing of 19th century wood and iron truss bridges in the U.S.," in *First International Congress on Construction History*, pp. 977–986.
- [3] K. Lee, "The Father of American Bridge," *The Concordensis*, p. B15.
- [4] R. L. D. editado por William D. Middleton, George Smerk, *Encyclopedia of North American Railroads*, 1st ed. Indiana, 2007.
- [5] P. Navarro, *La ingeniería de la bicicleta*, 1ª Edición. Madrid: Fundación Esteyco, 2010.
- [6] J. A. D. Ackroyd, "Sir George Cayley: The Invention of the Aeroplane near Scarborough at the Time of Trafalgar," *J. Aeronaut. Hist.*, vol. 2011/6, pp. 130–181, 2011.
- [7] E. C. English, "Vladimir Shukhov and the Invention of Hyperboloid Structures," *Struct. Congr. 2005*, vol. 40753, no. April 2005, pp. 1–9, 2005.
- [8] D. CARSTENS, SÖNKE; KUHL, "journal of the international association for shell and spatial structures," *148*, vol. 46, no. 2, p. 116, 2005.
- [9] S. Van De Voorde, V. U. Brussel, and L. Taerwe, "Beton in de Belgische architectuur, 2: Abraham Lipski en de uitvinding van de preflex-balk," *cement*, no. January, pp. 26–29, 2008.
- [10] Rubiera, "Vigas Rubiera Preflex," *ABC s.l. Madrid*, p. 26.
- [11] E. CAPELLÁN MIGUEL, GUILLERMO; MARTÍNEZ APARICIO, JAVIER; ROJO VÉLEZ, *Guía para el apriete de uniones con tornillos pretensados*, 1st ed. Madrid: APTA, 2009.
- [12] P. Rogers, "A Prestressed Steel Space Frame," *AISC Eng. J.*, pp. 62–67, 1966.
- [13] H. Corres Peiretti and A. Perez Caldentey, "Un ejemplo de estructura mixta combinada con pretensado exterior: el nuevo puente sobre el barranco de Cavalls en Valencia," *FHECOR*, no. 211, pp. 53–62, 1999.
- [14] J. Martínez Calzón and M. Gómez Navarro, "Torre Espacio. La estructura del edificio.," *Torre Espac. Build. Struct.*, vol. 59, no. 249, pp. 19–43, 2008.
- [15] P. C. B. T. J. L. R.-W. M. J. Rodríguez, "Aplicación del pretensado en las estructuras metálicas," *Hormigón y acero*, vol. 196, pp. 147–151, 1995.
- [16] I. Costales, "El Pretensado en las estructuras de acero," Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.
- [17] J. Heyman, A. Albuerne, and H. Santiago, *Basic Structural Theory*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 2011.
- [18] L. Viñuela Rueda and R. J. Martínez Salcedo, "Estructura metálica y fachadas tensadas del nuevo Edificio Terminal.," *hormigón y acero*, vol. 239, 2006.
- [19] Q. Alonso, Luis; Sanchez, *Hesperia Tower. Historia de un proyecto*, Primera Ed. 2006.